

# Modelización de la fusión parcial en equilibrio en una fuente mantélica metasomatizada. El volcanismo Cuaternario de La Garrotxa (Cataluña)

J.M. Cebriá, J. López-Ruiz, M. Doblas<sup>1</sup> y R. Oyarzun<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dpto. de Geología, Museo Nacional de Ciencias Naturales (CSIC), José Gutiérrez Abascal 2, 28006 Madrid.

<sup>2</sup> Dpto. de Mineralogía y Cristalografía, Fac. de Ciencias Geológicas, Univ. Complutense de Madrid, 28040 Madrid.

## ABSTRACT

*Trace element modelling together with the use of radiogenic and stable isotopic ratios, is a widely used tool to constrain the characteristics of the mantle sources of basaltic series. However, as the composition of the volcanic rocks may be the result of several combined magmatic processes, it is necessary to identify them before any attempt to their quantitative modelling. On the other hand, the information provided by partial melting modelling is limited to the final composition of the mantle source whereas some characteristics, like the presence of minor phases, can be cloaked if those minerals have not remained in the residue.*

*A good example to illustrate the problems of this method is found in the Quaternary primitive basaltic rocks of La Garrotxa (NE Volcanic Region of Spain) which, according to a combined study of trace element modelling and Sr-Nd-Pb isotopic ratios, can be interpreted as the result of the melting of a previously enriched lithospheric source which has been subsequently pervaded by basaltic melts derived from a common European sublithospheric reservoir.*

**Key words:** mantle lithosphere, mantle metasomatism, partial melting, trace element modelling, NE Volcanic Province of Spain.

## INTRODUCCIÓN

Los elementos traza, en combinación con los isótopos radiogénicos y estables, constituyen en la actualidad una de las herramientas más comúnmente utilizadas para estudiar los procesos por los que se generan los magmas. Como la composición química que exhiben las rocas volcánicas puede ser el resultado de una serie combinada de procesos, antes de iniciar la modelización cuantitativa hay que intentar identificar los procesos que han tenido lugar y elegir las muestras más adecuadas. Así por ejemplo, si lo que se persigue es determinar la composición mineralógica y química de la fuente, hay que seleccionar lavas que representen líquidos primarios, con lo que se eliminan las rocas que han modificado su composición por cristalización fraccionada y/o asimilación.

Por otra parte, hay que tener presente que la modelización de la fusión parcial únicamente suministra información sobre la composición final de la fuente y que la presencia de una fase minoritaria (p. ej. flogopita) que ha intervenido en el proceso, puede no ser detectada si esta no ha quedado en el residuo. Finalmente, es preciso indicar que los análisis químicos deben ser de calidad y las rocas que se intenta modelizar no deben haber sufrido procesos

de alteración, pues incluso si éstos han sido débiles, las abundancias de algunos elementos (p. ej. K, Rb, Ba y Sr) y sobre todo las relaciones isotópicas, pueden haber sido notablemente modificadas.

Las lavas basálticas, mayoritariamente primitivas, de La Garrotxa constituyen un excelente ejemplo de cómo el análisis combinado de los elementos traza y de los isótopos de Sr, Nd y Pb permite establecer la historia evolutiva de su fuente mantélica.

## EL VOLCANISMO DE GARROTXA EN EL CONTEXTO DEL VOLCANISMO CENOZOICO DE EUROPA

La Región volcánica del NE de España se encuentra situada al sur de los Pirineos. Esta región la integran tres áreas principales (Ampurdán, Selva y La Garrotxa) que corresponden a fosas tectónicas condicionadas por un sistema de fracturación dominado por direcciones NO-SE y SO-NE, originadas por procesos extensionales en el Mioceno Medio. En Ampurdán el volcanismo se generó entre los 10-9 Ma, en Selva entre 7-2 Ma y en La Garrotxa entre 700.000 y 11.500 años. Esta diferencia de edad explica el que las lavas de La Garrotxa sean las mejor conservadas de la región, lo que unido al hecho de que en este área se encuen-



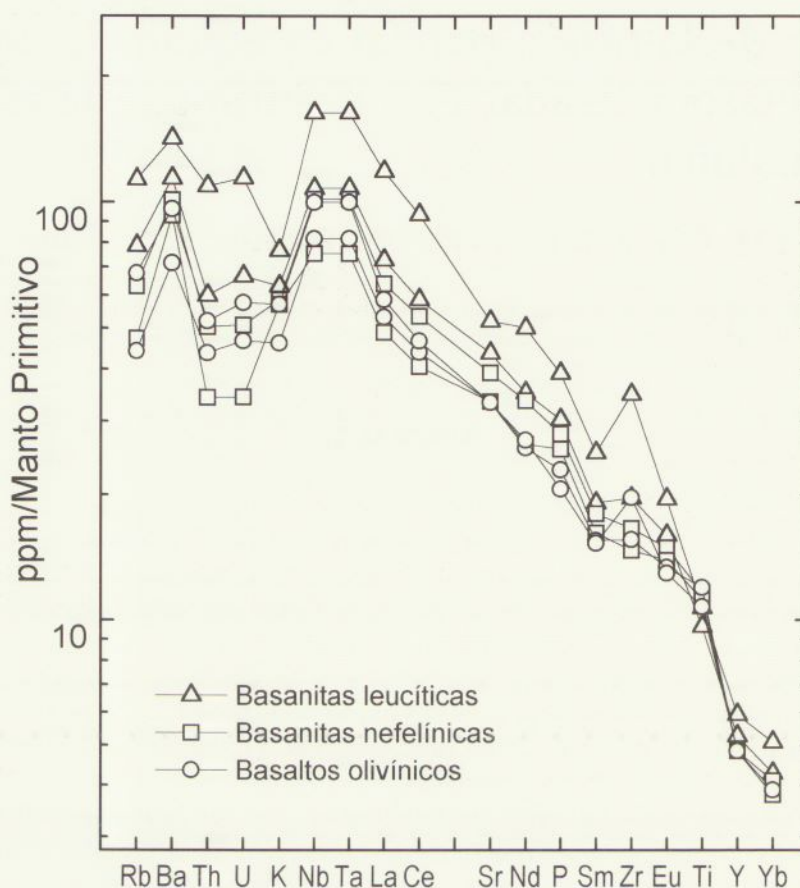


FIGURA 1: Diagramas multielementales normalizados respecto al Manto Primitivo (según Sun y McDonough, 1989) de análisis representativos de lavas primarias de La Garrotxa.

tran representados todos los tipos litológicos primitivos de la Región del NE, la hacen ideal para abordar la modelización de su proceso genético.

Las lavas de La Garrotxa se pueden dividir en tres grupos en función de su mineralogía modal y normativa (López-Ruiz y Rodríguez-Badiola, 1985): basanitas leucíticas, basanitas nefelínicas y basaltos olivínicos. La mayor parte de las lavas tienen características típicas de basaltos primitivos, ya que presentan elevadas proporciones de MgO, TiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Ni, y Cr, tienen valores mg#=58-63, y son frecuentes los xenolitos de peridotitas. Los diagramas normalizados de elementos traza (Fig. 1) muestran una gran homogeneidad y se caracterizan por grados variables de enriquecimiento, con anomalías positivas en Ba y Nb-Ta. En general, estos diagramas son similares a los que se observan en rocas equivalentes de la provincia volcánica Cenozoica de Europa (ver p. ej. Wilson y Downes, 1991) y análogos a los de basaltos de islas oceánicas con afinidad al componente HIMU (ver p. ej. Weaver, 1991).

Las variaciones de elementos traza observadas en estas rocas, se han interpretado como el resultado de un proceso de fusión parcial de un manto homogéneo con granate, en el que una fase potásica ha permanecido en el residuo, mediante tasas de fusión comprendidas entre ~4% para las basanitas leucíticas y ~16% para los basaltos olivínicos (ver p. ej. López-Ruiz y Rodríguez-Badiola, 1985 y Cebriá

*et al.*, 2000). Sin embargo, los caracteres isotópicos de Sr-Nd-Pb de estas rocas (Cebriá *et al.*, 2000) indican que dicha fuente es isotópicamente heterogénea.

La aparente contradicción de los resultados obtenidos a partir de los elementos traza y de los que sugieren los datos isotópicos, se puede explicar si se tiene en cuenta el modelo propuesto para el volcanismo Cenozoico europeo (ver Cebriá y Wilson, 1995). Según este modelo, dicho volcanismo sería el resultado de la interacción de dos componentes mantélicos: 1) Un componente litosférico enriquecido de composición variable y que da lugar a lavas potásicas (en general, leucíticas), que muestran una notable heterogeneidad regional, y 2) Un componente sublitosférico geoquímicamente homogéneo denominado Reservorio Astenosférico Europeo (EAR, *European Asthenospheric Reservoir*), que da lugar a series basálticas (sódicas) subsaturadas (melilititas, nefelinitas, basanitas, basaltos olivínicos) con una gran uniformidad composicional, tanto en lo que concierne a los elementos traza como a las relaciones isotópicas. La existencia en cada región volcánica de lavas con características intermedias entre el correspondiente componente litosférico y el EAR, se explica por la interacción de los magmas derivados de este reservorio con porciones enriquecidas del manto litosférico.

De acuerdo con este modelo, los magmas generados a partir del manto sublitosférico de tipo EAR poseerán su

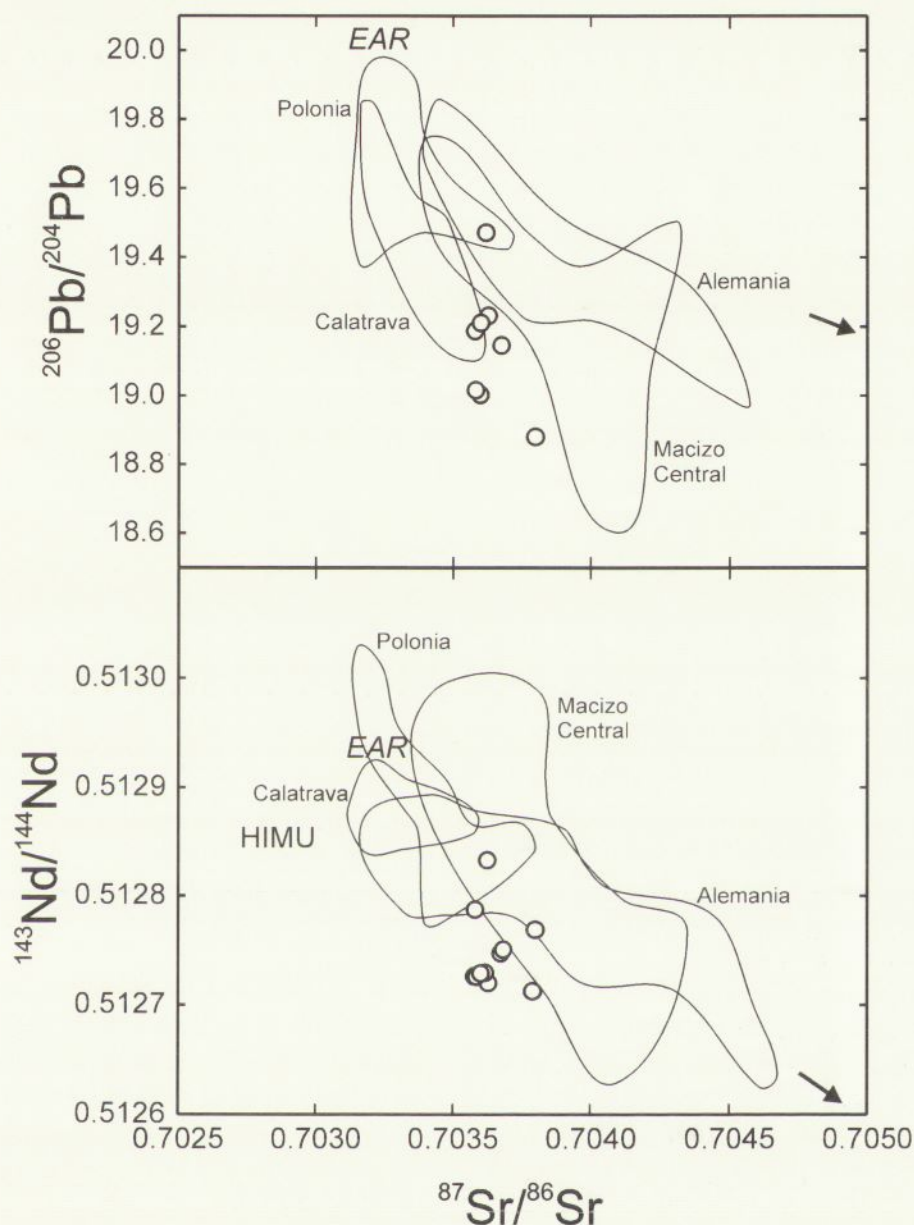


FIGURA 2: Diagramas  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  vs  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  y  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  para las lavas de La Garrotxa. Los campos delimitan la composición de muestras de Calatrava, Macizo Central, Polonia y de las provincias volcánicas de Alemania. La flecha señala la posición (fuera de los límites del diagrama) de las leucititas de Calatrava. La zona sombreada corresponde al campo del EAR según Cebriá y Wilson (1995).

signatura isotópica. Como se puede observar en la figura 2, las lavas de La Garrotxa no representan líquidos de tipo EAR sino que están enriquecidas en  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  y empobrecidas en Nd y Pb radiogénicos. Si el carácter intermedio de las lavas de Garrotxa es consecuencia de la interacción entre un componente litosférico enriquecido y magmas procedentes del EAR, su composición debería ajustarse en diagramas del tipo elemento-relación a las pautas descritas por Sims y DePaolo (1997). En estos diagramas, las curvas de fusión parcial finalizan ( $F=100\%$ ) en la composición de la fuente, que se debe situar sobre la curva de mezcla simple entre los dos componentes que intervienen en la hibridación de la fuente. En el caso de La Garrotxa, la curva de fusión y la composición de la fuente vienen

dadas por el modelo cuantitativo obtenido con los elementos traza. Por lo que respecta a la curva de mezcla, la hipótesis planteada implica que la composición de uno de los componentes debe estar representada por líquidos derivados del EAR. A efectos de cálculo, se ha tomado la concentración media de las melilititas y nefelinitas de la región vecina de Calatrava cuyas relaciones isotópicas coinciden con las propuestas para el EAR. La composición del componente litosférico es más difícil de establecer, ya que no existen datos disponibles y ésta puede variar dentro de rangos muy amplios (ver McDonough, 1990). No obstante, si adoptamos valores próximos a la composición media de peridotitas litosféricas con espina de McDonough (1990), se obtiene un ajuste aceptable



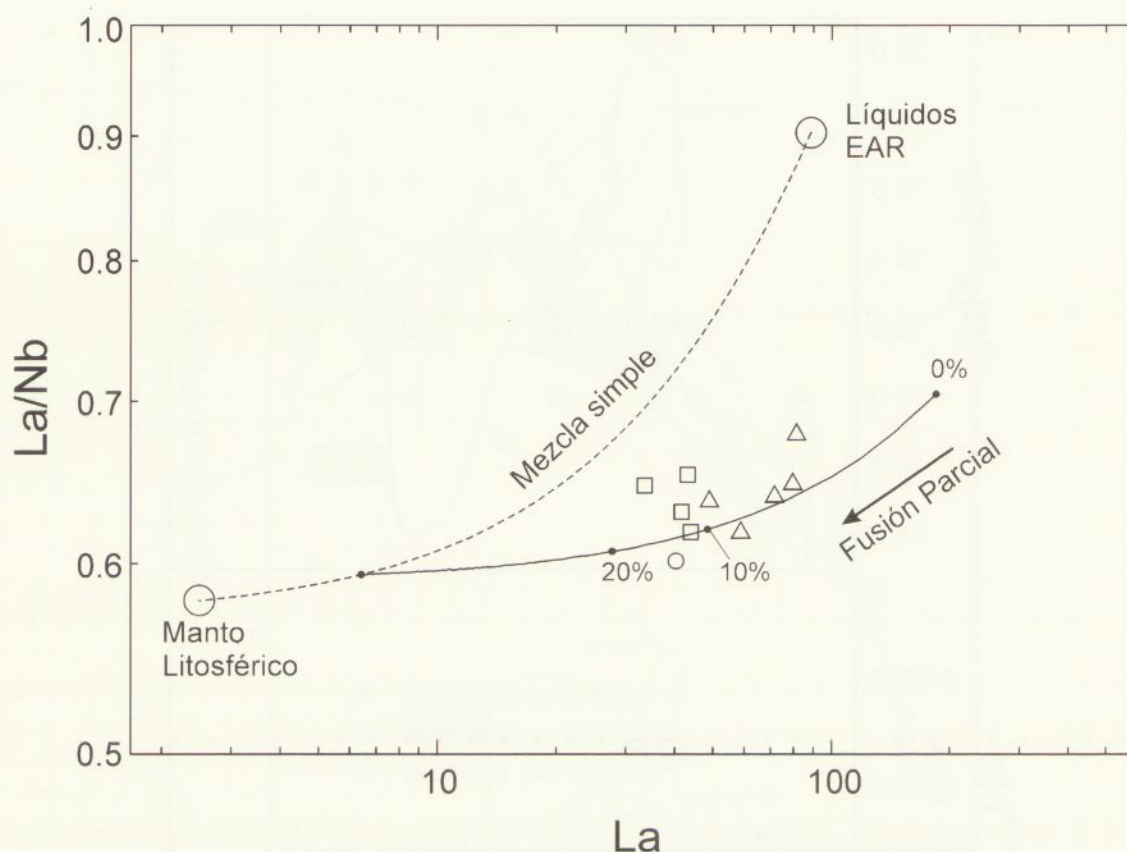


FIGURA 3: Diagrama logarítmico La/Nb-La para los magmas primarios de La Garrotxa (símbolos como en la figura 1). Los porcentajes sobre la curva de fusión indican valores del grado de fusión.

de todos los parámetros en el diagrama La/Nb-La, sugiriendo una participación del ~5% de líquidos derivados del EAR (ver Fig. 3). La alta concentración de Nb requerida para el componente litosférico implica que debe tratarse de un manto enriquecido, similar al representado por algunas lherzolitas potásicas que aparecen como xenolitos en la región NO de Alemania (Harmann y Wedepohl, 1990). Este modelo permite también explicar el carácter intermedio y las variaciones observadas en la signatura isotópica de las lavas de La Garrotxa.

Queda por dilucidar si la presencia de las fases minerales de la fuente, identificadas a partir de los elementos traza, estaban presentes en la fuente litosférica "inicial" o fueron introducidas durante el proceso metasomático procedente del componente sublitosférico. Puesto que la fuente litosférica "inicial" está enriquecida y su composición debe ser análoga a la observada en algunas lherzolitas espinelíferas con anfíbol/flogopita del centro de Europa, es probable que la fase potásica sea una característica propia de la fuente litosférica, anterior a la infiltración de líquidos EAR. Sin embargo, la presencia de una fase potásica ha sido detectada en la fuente de líquidos EAR (ver p. ej. Cebriá y López-Ruiz, 1995), por lo que es también probable que el metasomatismo haya incrementado la signatura potásica inicial. Por el contrario, la presencia de granate no es necesariamente propia del manto litosférico "inicial", donde la fase aluminica predominante suele ser la espinela,

por lo que puede tratarse de una característica heredada del manto fuente de los líquidos EAR, generados a mayor profundidad y cuya modelización suele identificar al granate como fase mantélica residual (ver. p. ej. Cebriá y López-Ruiz, 1995).

## CONCLUSIONES

El modelo petrogenético basado en los elementos traza y en las relaciones isotópicas de Sr-Nd-Pb, implica: 1) Que los líquidos basálticos de La Garrotxa se han generado en el manto litosférico; 2) Que esta fuente mantélica ha sufrido, al menos, dos eventos de metasomatismo (uno antiguo, responsable del carácter enriquecido de la fuente litosférica "inicial", y otro reciente por infiltración de líquidos basálticos de tipo EAR); 3) Que este proceso de hibridación da lugar a una fuente mineralógicamente homogénea (por lo que las variaciones en elementos traza que exhiben los magmas son coherentes con un modelo cuantitativo de fusión parcial a partir de una única fuente), pero isotópicamente heterogénea.

Aunque es difícil establecer cual fue el origen del primer evento metasomático, la evolución geodinámica de la región sugiere que pudo tener lugar durante el colapso extensional que siguió a la compresión Varisca, ya que en dicho proceso tuvo lugar una importante elevación del manto. A su vez, el segundo evento metasomático se produjo

inmediatamente después de la localización bajo Europa del EAR (Oyarzun *et al.*, 1997), y está relacionado con los procesos extensionales que se desarrollan en el área al inicio del Cenozoico. En el caso de la región volcánica del NE, es probable que el grado de extensión fuera muy reducido en las primeras etapas, lo que impidió que los primeros líquidos derivados del EAR alcanzaran la superficie. Al progresar los procesos extensionales al final del Mioceno, comienza la fusión del manto litosférico doblemente metasomatizado y la generación de un volcanismo activo con las características geoquímicas descritas.

Como se ha mostrado, aunque la modelización con elementos traza sigue siendo de importancia fundamental para establecer precisiones acerca de los procesos magmáticos, los resultados que se obtienen deben ser complementados con otras observaciones petrológicas y geoquímicas, con especial énfasis en las relaciones isotópicas. Asimismo, las conclusiones obtenidas deben ser coherentes con los modelos geodinámicos disponibles.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del proyecto PB95-0107, financiado por la Dirección General de Enseñanza Superior e Investigación Científica.

## REFERENCIAS

- Cebriá, J.M. y López-Ruiz, J. (1995): Alkali basalts and leucitites in an extensional intracontinental plate setting: The Late Cenozoic Calatrava Volcanic Province (Central Spain). *Lithos*, 35: 27-46.
- Cebriá, J.M. y Wilson, M. (1995): Cenozoic mafic magmatism in Western/Central Europe: A common european asthenospheric reservoir? *Terra Nova Abs. Sup.* 7: -162.
- Cebriá, J.M., López-Ruiz, J., Doblas, M., Oyarzun, J., Hertogen, J., y Benito, R. (2000): Geochemistry of the Quaternary alkali basalts of Garrotxa (NE Volcanic Province, Spain). A case of double enrichment of the mantle lithosphere. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 95: en prensa.
- Hartmann, G. y Wedepohl, K.H. (1990): Metasomatically altered peridotite xenoliths from the Hessian Depression (Northwest Germany). *Geochim. Cosmochim. Acta*, 54: 71-86.
- López-Ruiz, J. y Rodríguez-Badiola, E. (1985): La región volcánica Mio-Pleistocena del NE de España. *Estudios Geol.*, 41: 105-126.
- McDonough, W.F. (1990): Constraints on the composition of the continental lithosphere mantle. *Earth Planet. Sci. Letters*, 101: 1-18.
- Oyarzun, R., Doblas, M., López-Ruiz, J., y Cebriá, J.M. (1997): Opening of the central Atlantic and asymmetric mantle upwelling phenomena: Implications for long-lived magmatism in western North Africa and Europe. *Geology*, 25: 727-730.
- Sims, K.W.W. y DePaolo, D.J. (1997): Inferences about mantle magma sources from incompatible element concentration ratios in oceanic basalts. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 61: 765-784.
- Sun, S.S. y McDonough, W.F. (1989): Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In Saunders, A.D. y Norry, M.J. (eds): *Magmatism in the ocean basins*: 313-345.
- Weaver, B.L. (1991). The origin of ocean island basalt end-member compositions: trace element and isotopic constraints. *Earth Planet. Sci. Letters*, 104: 381-397.
- Wilson, M. y Downes, H. (1991): Tertiary-Quaternary extension-related alkaline magmatism in western and central Europe. *J. Petrol.*, 32: 811-849.